

И. Х. ГЕЛЛЕР

СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 615

И. Х. ГЕЛЛЕР

СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1966 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.314.634
Г31

Содержатся сведения об устройстве, конструкции и принципе действия селеновых выпрямителей, их электрических параметрах и свойствах. Рассмотрены наиболее употребительные схемы выпрямления и соотношения между основными электрическими показателями. Приведены особенности эксплуатации и номенклатура селеновых выпрямителей.

Предназначена для подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
389-66

Селен

Селен содержится в земной коре в количестве $10^{-5}\%$, что примерно в 5 раз превышает содержание серебра и примерно в 10 раз меньше содержания свинца. В основном селен встречается в виде незначительной примеси в медных сульфидных рудах и в серном колчедане. Он извлекается как побочный продукт при переработке этих руд.

Технический селен подвергается очистке химическим способом, а также перегоняется в вакууме до получения химически чистого селена. Для изготовления селеновых выпрямителей пригоден только специальный «селен для выпрямителей». Содержание примесей в этом селене контролируется химическим и спектральным анализом.

Селен находится в VI группе периодической системы элементов Менделеева. Атомный вес селена 78,96. В твердом виде селен существует как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии. Твердый аморфный или стекловидный селен получается при быстром охлаждении расплавленного селена. Стекловидный селен неустойчив, он постепенно переходит в кристаллический селен, имеющий гексагональную структуру. Быстрота преобразования аморфного селена в кристаллический зависит от температуры. При температуре около 80° С кристаллизация может длиться сотни часов. При температуре 218° С для этого требуются минуты.

Аморфный и кристаллический селен отличаются по физическим свойствам. Так, плотность кристаллического гексагонального селена равна 4,8 *г/см*^{3}, а плотность аморфного стекловидного селена — 4,2 *г/см*^{3}. Стекловидный селен является изолятором с удельным сопротивлением порядка 10^{13} *ом · см*. Удельное сопротивление гексагонального селена порядка 10^5 *ом · см*.

Гексагональный селен является типичным дырочным полупроводником. Ширина его запрещенной зоны составляет около 2 *эв*. Подвижность дырок в селене очень мала. При комнатной температуре она меньше 1 *см*^{2} *· в · сек*. Для сравнения укажем, что подвижность электронов и дырок в германии равна 3 600 и 1 700 *см*^{2}*/в · сек* соответственно.

К числу физических особенностей гексагонального селена относится большой разброс величины электропроводности после кристаллизации, проведенной в различных условиях. Величина удельной электропроводности образцов гексагонального селена при одном и том же химическом составе исходного материала может отличать-

ся в сотни и тысячи раз в зависимости от температуры и времени кристаллизации и методов ее проведения. Причиной столь большого разброса является различная структура образующегося кристаллического селена.

Рассмотрим механизм преобразования различных форм селена. Расплавленный селен состоит частично из замкнутых колец и частично из длинных цепей атомов, беспорядочно расположенных и перепутанных между собой. Количество атомов в цепочках селена может достигать нескольких тысяч. При изменении температуры средняя длина цепочек изменяется, вследствие чего изменяется вязкость селена. В этом отношении селен похож на серу, которая также находится в нескольких аллотропических формах и в зависимости от температуры может состоять из замкнутых колец, содержащих по 8 атомов, и открытых цепочек разной длины, имея соответственно различную вязкость.

При остывании расплавленного селена образующийся аморфный стекловидный селен сохраняет структуру длинных запутанных нитей, т. е. является как бы переохлажденной жидкостью.

В процессе кристаллизации атомы селена должны образовать правильную кристаллическую решетку. Они формируются в длинные спиральные цепочки, ориентированные параллельно друг другу. Расстояние между соседними атомами вдоль цепочки 2,36 Å, а наикратчайшее расстояние между двумя атомами соседних цепочек равно 3,45 Å. Правильно расположенные атомы образуют гексагональную элементарную ячейку.

Таким образом, процесс кристаллизации связан с разрывом колец и длинных запутанных цепей атомов селена и сложной их перестройкой.

При кристаллизации селена не удается получить монокристаллы больших размеров. Гексагональный селен представляет собой поликристалл, т. е. состоит из большого числа отдельных маленьких кристаллов с правильной ориентацией атомов. На границах этих кристаллов могут образовываться полуаморфные слои с пониженной электропроводностью. Это означает, что кристаллики отделены друг от друга высокими переходными сопротивлениями соприкасающихся поверхностей. Наличие на границах кристаллов изолирующих полуаморфных слоев оказывает очень большое влияние на электрические параметры селена и в первую очередь на его электропроводность.

Отдельные кристаллики также имеют большое количество дефектов кристаллической решетки, обусловленных трудностью перестройки атомов селена в процессе кристаллизации. Одной из причин образования дефектов является неодинаковое значение температурного коэффициента линейного расширения монокристаллов селена в различных направлениях. Вследствие этого в поликристаллическом селене при повышенной температуре возможно образование локальных механических напряжений, разрывов и других дефектов, искажающих идеальную кристаллическую решетку.

Значительное изменение плотности селена при переходе из стекловидного состояния в кристаллическое (от 4,2 до 4,8 $г/см^3$) также вызывает нарушение однородности материала, что не может не сказаться на его свойствах. Таким образом, очевидно, что свойства того или иного образца селена, полученного при кристаллизации, в зна-

чительной степени определяются условиями, в которых происходило термическое преобразование.

Как и другие полупроводники, селен изменяет свои характеристики в зависимости от примесей. Однако влияние примесей в селене имеет некоторые специфические особенности. Известно, что в таких полупроводниках, как германий или кремний, примесные атомы элементов III и V групп таблицы Менделеева, являющиеся соответственно акцепторами или донорами, определяют тип проводимости материала — дырочный или электронный. Между тем селен является типичным дырочным полупроводником, т. е. имеет носители тока только одного знака. Введение примесей в селен может значительно изменять величину электропроводности, но не изменяет механизм проводимости, которая во всех случаях остается дырочной. Исключение составляют случаи, когда в селен вводится большое количество (до нескольких процентов) ртути или висмута. Однако эти случаи не имеют практического значения для рассматриваемых нами вопросов.

Природа дырочной проводимости гексагонального селена до сих пор остается загадкой. Предполагается, что, помимо посторонних примесей, акцепторами являются также отдельные атомы селена, оторвавшиеся от длинных цепочек атомов и не пристроившиеся к кристаллам. Такое предположение о природе проводимости в селене подкрепляется тем, что посторонние примеси действуют в селене не столь значительно, как это имеет место в германии или кремнии или в других полупроводниках, получающихся из расплавов в виде монокристаллов.

Характеризуя действие примесей, можно в общем сказать, что присадки галоидов — хлора, брома или иода — увеличивают электропроводность селена, а металлы в основном ее уменьшают. Особенно сильным является действие атомов таллия. Небольшие добавки таллия могут увеличить сопротивление гексагонального селена в миллионы раз.

Проведенные физиками исследования показали, что действие галоидов и таллия в селене может быть объяснено изменением проводимости межкристаллических прослоек. В свете этой теории структура гексагонального селена представляется в виде кристаллов с хорошей проводимостью, контактирующих друг с другом через плохо проводящие слои, где в основном и размещаются атомы примеси. При этом галоиды понижают, а атомы таллия увеличивают сопротивление этих слоев. Это подтверждается измерением на высокой частоте удельного сопротивления образцов селена, содержащих таллий.

Эффект выпрямления в селеновых вентилях

Классическая картина выпрямления в полупроводниковых приборах основывается на наличии электронно-дырочного перехода. Такой переход, называемый сокращенно *p-n* переходом, образуется, например, в едином кристалле германия или кремния путем введения в разные его области элементов III и V групп периодической таблицы Менделеева.

Казалось бы, что в селеновых вентилях *p-n* переход не может быть осуществлен, поскольку кристаллический селен является типичным дырочным полупроводником, а селен с электронным механизмом проводимости не может быть получен.

При изготовлении вентиля на поверхность селена разбрызгиванием в расплавленном состоянии наносят металлический сплав, содержащий кадмий. Когда полупроводник и металл находятся в тесном контакте, пограничный слой полупроводника может быть обеднен или обогащен носителями заряда. Это зависит от разности работ выхода полупроводника и металла и от типа проводимости полупроводника. Напомним, что работой выхода называется та минимальная энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы он мог покинуть тело.

Обедненные носителями заряда слои полупроводника имеют значительно большее сопротивление, чем объем кристалла, и называются запирающими слоями. Сопротивление запирающего слоя зависит от полярности и величины приложенного напряжения. Так, например, для случая контакта с металлом дырочного полупроводника «плюс» на полупроводнике и «минус» на металле соответствуют так называемому прямому току. При такой полярности напряжения запирающий слой «заливается» носителями и исчезает. При противоположной полярности напряжения запирающий слой расширяется и сопротивление его становится большим.

Однако такая теория неприменима по отношению к техническим твердым выпрямителям, у которых эффект выпрямления значительно больше, чем это наблюдается у контактов полупроводников с металлами.

Высокий коэффициент выпрямления у меднозакисных и селеновых вентилей может быть объяснен только существованием в них *p-n* перехода. Наличие такого перехода было подтверждено экспериментально. В меднозакисных вентилях была обнаружена электронная закись меди, граничащая с дырочной закисью. Было также установлено, что в процессе изготовления селенового вентиля на границе полупроводника с металлом образуется электронный полупроводник. Если отделить металлический электрод от поверхности селена, то на той стороне электрода, которая была в соприкосновении с селеном, можно обнаружить тонкую прослойку нового вещества, не являющегося ни селеном, ни сплавом.

Исследования показали, что между селеном и металлом образуется селенид кадмия или сульфид кадмия, что зависит от метода изготовления вентилей. И селенид кадмия, и сульфид кадмия — электронные полупроводники с большим удельным сопротивлением (порядка 10^9 *ом · см*) и с шириной запрещенной зоны около 2,3 *эв*, т. е. близкой к ширине запрещенной зоны селена. Таким образом, в селеновых вентилях большой коэффициент выпрямления объясняется существованием в них *p-n* перехода. Однако в отличие от германиевых и кремниевых приборов, где *p-n* переход создается внутри единого кристалла и области с электронным и дырочным механизмами проводимости не отличаются друг от друга по химическому составу, в селеновых вентилях электронный полупроводник является новым химическим веществом, образующимся в процессе технологической обработки вентиля.

Тонкие слои полупроводника, имеющие химический состав, отличный от основного полупроводника, и образующиеся в процессе специальной обработки, называются химическими запирающими слоями.

Конструкция и технология изготовления селеновых вентилей и выпрямителей

Плотность тока в селеновых вентилях при нормальных условиях не превышает 50 *ма/см²*, поэтому вентили имеют большую площадь. Они представляют собой пластины круглой, квадратной или прямоугольной формы, с центральным отверстием или без него. Размеры вентилей — от таблет диаметром 5 *мм* до прямоугольных пластин 100×400 *мм* (рис. 1).

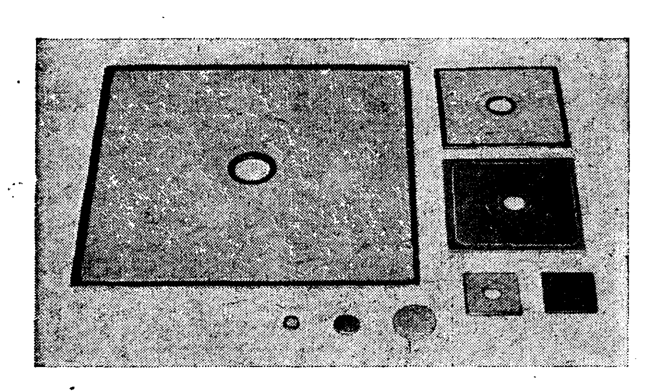


Рис. 1. Внешний вид селеновых вентилей.

Отечественные селеновые вентили имеют две принципиально отличные друг от друга конструкции — вентили серии А и серии Г. Вентили обеих серий можно различить по внешнему виду. В вентилях серии А одним электродом (основанием вентиля) служит алюминиевая пластина толщиной 0,8 *мм*, имеющая шероховатую поверхность, а другой, верхний электрод представляет собой катодный сплав, нанесенный на селен разбрызгиванием. В вентилях серии Г основанием также служит алюминиевая пластина толщиной 0,8 *мм*, но поверхность ее гладкая, полированная; вторым электродом служит алюминиевая фольга, впрессованная в селен. В обоих случаях со стороны верхнего электрода по краям пластины видна узкая (1—1,5 *мм*) кромка серого селена.

Полярность вентилей серий А и Г различная. У вентилей серии А алюминиевая пластина является анодом, а катодный сплав — катодом, т. е. вентиль проводит ток в направлении от алюминия к катодному сплаву; вентили же серии Г проводят ток в направлении от впрессованной в селен фольги к алюминиевой пластине. Различная полярность вентилей серий А и Г объясняется их разной внутренней структурой и различной технологией изготовления.

Внутреннее устройство селенового вентиля можно представить себе как слой селена, граничащий с одной стороны с электронным полупроводником, с которым он образует *p-n* переход, а с другой стороны — с материалом, создающим низкоомный омический контакт.

Мы уже говорили о том, что электронным полупроводником является либо сульфид кадмия, либо селенид кадмия, которые образуются на одной из стадий изготовления вентиля. Что же касается низкоомного омического контакта, то наилучшим образом этому требованию удовлетворяют контакты селена с золотом, висмутом и никелем. При этом следует иметь ввиду, что к контакту предъявляется требование стабильности в условиях длительной эксплуатации. Поясним это следующим примером. Непосредственно после изготовления вентили, в которых селен контактирует с железом и с никелем, не отличаются по величине переходного сопротивления между собой. Однако в процессе работы при повышенной температуре переходное сопротивление на границе селена с железом значительно возрастает, и характеристики вентиля через короткий промежуток времени ухудшаются, в то время как сопротивление контактов селен — никель почти не изменяется.

Золото для создания омического контакта с селеном не используют. Применяют висмут или никель, но не в виде отдельных пластин, а в виде тонких покрытий на алюминий, нанесенных в вакууме. Иногда за границей для маленьких вентилей вместо алюминия используют железную таблетку, покрытую никелем. Никель наносят гальваническим путем.

Рассмотрим процесс изготовления селенового вентиля серии А. Различные слои материалов, составляющие вентиль, последовательно наносят на алюминиевое основание. Предварительно основание обезжиривают и обрабатывают песком для придания поверхности шероховатости. Это необходимо для лучшего сцепления селена с основой. Затем на алюминиевое основание наносят висмут, слой которого настолько тонок, что шероховатость поверхности сохраняется. На висмут наносят в вакууме аморфный селен в виде слоя толщиной 50—60 *мк*. Кристаллизацию селена проводят в специальных печах в два этапа: сначала при низкой температуре, а затем при температуре, близкой к его температуре плавления. При этом, помимо кристаллизации, резко снижающей сопротивление толщи селена, происходит обеднение галоидами его внешних, близких к поверхности слоев. Уменьшение концентрации галоидов приводит к увеличению удельного сопротивления поверхностного слоя селена. Благодаря этому улучшаются условия выпрямления в контакте селена с электронным полупроводником.

Для образования электронного полупроводника, граничащего с селеном, на поверхность селена последовательно наносят тонкий слой серы, а затем с помощью специальных распылителей — катодный сплав, содержащий кадмий. После нанесения катодного сплава вентиль уже приобретает выпрямляющие свойства. Однако коэффициент выпрямления еще мал, так как выпрямляющий эффект обусловлен только разностью контактных потенциалов селена и катодного сплава, электронный полупроводник — сульфид кадмия — еще не образован.

Для того чтобы вентиль стал технически пригодным выпрямительным элементом, он должен быть подвергнут еще одной весьма важной технологической операции — электрической формовке. Она проводится путем подачи на вентиль напряжения в запирающем направлении. При этом через вентиль проходит значительный, обратный ток. Обычно напряжение повышают постепенно во избежание перегрева и значительных прожогов. Электрическая формовка — дли-

тельная операция и может продолжаться несколько часов. Внешне эффект формовки вентилей выражается в значительном уменьшении обратного тока. Вначале спад тока идет довольно быстро, а затем замедляется. Обычно формовку прекращают, когда значение обратного тока через вентиль стабилизируется.

В процессе формовки на границе селена и катодного сплава выделяется значительная мощность и температура в области контакта повышается. Благодаря этому создаются благоприятные условия для диффузии атомов кадмия в область селенового слоя и для образования соединений кадмия с расположенной на поверхности селена серой. В результате получается сульфид кадмия, т. е. электронный полупроводник, граничащий с селеном. Таким образом, благодаря электрической формовке внутри селенового вентиля образуется *p-n* переход.

Соединение кадмия с серой может происходить и без пропускания через вентиль электрического тока, например, при помещении вентиля в термостат с достаточно высокой температурой. Однако по своему действию термоформовка значительно уступает электрической формовке. При электрической формовке ток распределяется неравномерно по площади вентиля. Плотность тока больше в тех местах, где запирающий слой менее совершенен. Это приводит к местному повышению температуры и к более интенсивному протеканию реакции образования электронного полупроводника. Таким образом, происходит выравнивание толщины химического запирающего слоя по площади вентиля, что не имеет места при термоформовке.

При электрической формовке на вентиль подается напряжение, значительно превышающее рабочее. Оно практически целиком приложено к *p-n* переходу, где вследствие этого возникает электрическое поле большой напряженности. В этом поле могут перемещаться ионы примеси, в том числе отрицательные ионы галоидов, уменьшая концентрацию примесных центров в пограничном слое селена; при этом эффект выпрямления возрастает.

Вентили серии А имеют «открытый» запирающий слой, который расположен на внешней стороне селенового слоя — под пористым катодным сплавом. Так как катодный сплав проницаем для паров воды, «открытый» запирающий слой при неблагоприятных условиях, например при повышенной влажности, может значительно ухудшить свои свойства. Поэтому вентили серии А должны быть окрашены специальными влагостойкими красками или лаками. Окраска производится не на отдельных вентилях, а после сборки вентилей в столбы.

У вентилей серии Г запирающий слой «закрыт». Он расположен между алюминиевым основанием и слоем селена и, таким образом, доступен действию наружной атмосферы только по торцу вентиля. Условия образования и защиты «закрытого» запирающего слоя более благоприятны, чем «открытого», поэтому рабочее напряжение у вентилей серии Г значительно выше, чем у вентилей серии А. Конструкция вентилей обеих серий показана на рис. 2.

Одной из разновидностей селеновых вентилей с «открытым» запирающим слоем являются «таллиевые» вентили Эти вентили имеют хорошую характеристику в пропускном направлении. Они способны работать при удвоенной против обычных вентилей плотности тока. Для вентилей серий А и Г номинальная плотность тока составляет 25 *ма/см*², а для «таллиевых» вентилей она равна 50 *ма/см*².

Конструкция селеновых выпрямителей может быть разнообразной. Выпрямители общего применения конструктивно оформляют в виде столбиков. Для этого применяют селеновые вентили, имеющие центральное отверстие. Их нанизывают на металлическую изо-

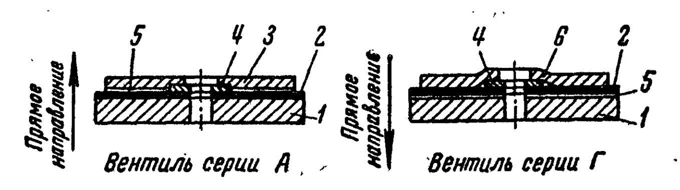


Рис. 2. Конструкция селеновых вентилей серий А и Г.

1 — алюминиевое основание; 2 — слой селена; 3 — катодный сплав; 4 — лаковое кольцо (для серии А) или бумажная шайба (для серии Г); 5 — запорный слой; 6 — алюминиевая фольга.

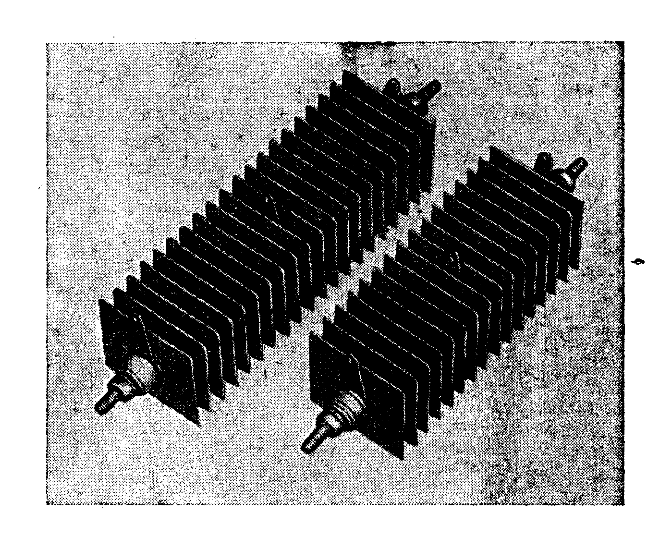


Рис. 3. Селеновые выпрямительные столбики

лированную бумагой шпильку и стягивают гайками (рис. 3). Между вентилями с помощью металлических дистанционных шайб выдерживают определенное расстояние. Оно выбирается исходя из рассеиваемой в выпрямителе мощности с учетом допустимой температуры нагрева вентилей.

Токосъемные шайбы, непосредственно прилегающие к катодному сплаву или к электроду из висмутированной фольги (в вентилях серии А или Г), имеют особую форму, благодаря которой исключа-

ется механическое повреждение вентиля около центрального отверстия. Кроме того, фигурные токосъемные шайбы соприкасаются с вентилем только в небольшой области вокруг центра, где у вентилей под катодным сплавом и под висмутированной фольгой помещается изоляционный слой из лака или бумаги.

При сборке выпрямителей на изолированной шпильке центральная часть элементов подвергается значительному давлению, что может привести к разрушению запорного слоя и к увеличению обратного тока. Однако в покрытом лаком или бумагой месте селен изолирован от катода и запорный слой не образуется. Поэтому на изолированный участок может оказываться большое давление без нарушения выпрямительных свойств.

Располагая между группами вентилей на шпильке токосъемные выводы и соединяя их между собой различным образом, можно получить разнообразные схемы соединения отдельных плеч выпрямителя (мостовые схемы, схемы со средней точкой или соединение групп вентилей последовательно или параллельно). При этом вентили могут набираться на шпильке в одной последовательности либо могут быть обращены друг к другу катодами или анодами. Иногда отдельные группы вентилей изолируют друг от друга шайбами из гетинакса или текстолита, что дает возможность образовать на шпильке две или несколько самостоятельных схем, электрически не связанных друг с другом.

Выпрямительные столбы, как правило, окрашивают специальными влагозащитными красками с последующей сушкой в термокамерах. Только в отдельных случаях, когда выпрямители предназначены для работы в трансформаторном масле, окраску столбиков не производят.

Количество выводов в выпрямительных столбиках определяется схемой соединения вентилей. Если столбик представляет собой одно плечо какой-либо схемы, то он имеет два концевых вывода; если столбик предназначен для работы в схеме со средней точкой либо представляет собой два плеча однофазной мостовой схемы, то количество выводов равно трем; в случае трехфазной мостовой схемы столбик имеет пять выводов и т. д.

Выводы выпрямителей маркируют следующим образом: катод — красной краской, анод — синей и выводы для переменного напряжения — желтой. Цветную маркировку выводов производят только для окрашенных столбиков.

Элементы прямоугольной и квадратной формы, не имеющие центрального отверстия, собирают в плоских корпусах и, как правило, по мостовой схеме. Металлический корпус имеет два сквозных отверстия для крепления к шасси устройства, например приемника, которое в этом случае служит радиатором, рассеивающим тепло, выделяющееся в выпрямителе. Включение выпрямителя без радиатора возможно при условии значительного снижения нагрузки выпрямителя против номинальных данных.

Вентили в виде круглых таблет диаметром 5 и 7 *мм* собирают в пластмассовых трубках. В одном из концов трубки имеется пружина, сжимающая таблеты для получения надежного контакта. Трубчатые выпрямители рассчитаны на выпрямленный ток в несколько миллиампер и на напряжение до нескольких киловольт. Они имеют два проволочных вывода, которые могут одновременно служить для крепления выпрямителя в устройствах. Торцы трубок

окрашены в красный и синий цвет для обозначения катода и анода выпрямителя.

Внешний вид выпрямителей в виде плоских корпусов и трубок изображен на рис. 4.

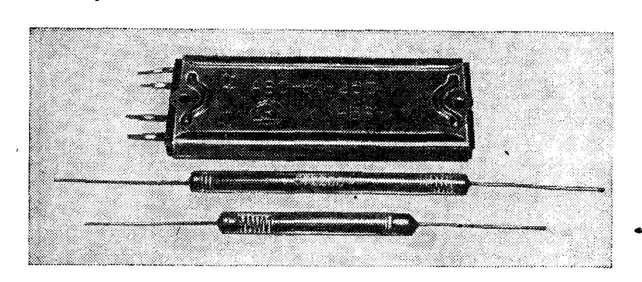


Рис. 4. Выпрямители в виде плоских корпусов и трубок.

Характеристики и классификация селеновых вентилей

При производстве селеновых вентилей нельзя получить их с совершенно одинаковыми характеристиками. Вентили имеют разброс по величине сопротивления в прямом направлении и по величине обратного тока. Для сборки в выпрямители должны быть подобраны вентили, близкие по электрическим параметрам.

Наиболее наглядно вентили могут быть охарактеризованы и сравнены между собой по виду вольт-амперной характеристики (рис. 5), которая показывает зависимость между током и напряжением в широком диапазоне их изменения. В пропускном направлении чем больше крутизна характеристики, тем меньше потери в вентиле при прохождении прямого тока. В запирающем направлении вентиль тем лучше, чем положе характеристика, т. е. чем меньше обратный ток при данном напряжении.

Вольт-амперная характеристика дает также возможность определить еще один основной параметр вентиля — допустимое для него предельное значение обратного напряжения. При увеличении обратного напряжения выше предельного обратный ток резко возрастает.

Вольт-амперные характеристики могут быть трех видов: статические, динамические и классификационные. Статические характеристики обычно строят при проведении физических исследований. Их снимают на постоянном токе раздельно для прямого и запирающего направления. Для промышленной классификации статические характеристики, как правило, не применяются, так как условия, в которых их снимают, не соответствуют реальным условиям работы вентилей.

В реальных условиях вентиль работает на переменном токе. В течение одного полупериода через него проходит прямой ток, а в другой полупериод он находится под обратным переменным напряжением. Реальным условиям работы больше всего соответствует динамическая вольт-амперная характеристика. Ее можно видеть на экране катодного осциллографа при включении вентиля по однофаз-

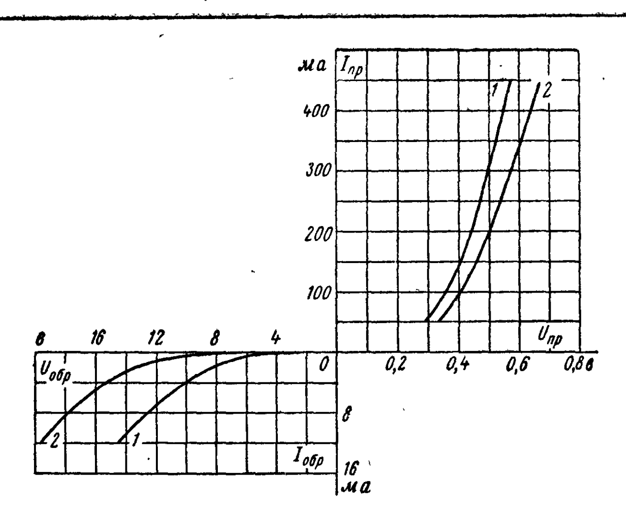


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики селеновых вентилей серий А (*1*) и Г (*2*).

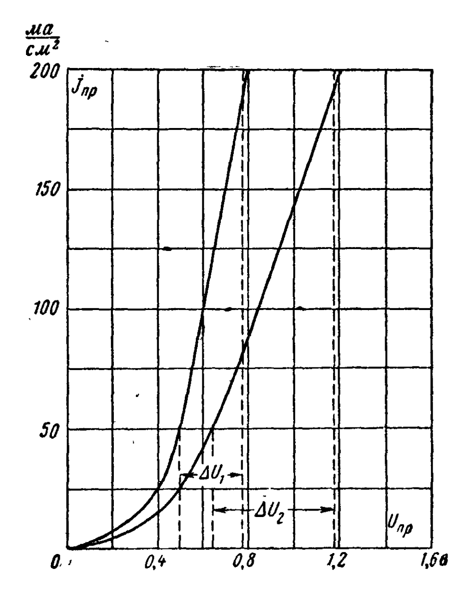


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики вентилей с разной крутизной.

ной однополупериодной схеме. Каждая точка вольт-амперной характеристики показывает соотношение между мгновенными значениями тока и напряжения в условиях, когда вентиль включен в цепь переменного тока.

Наблюдение динамической характеристики связано с трудностями, обусловленными отсутствием координатных осей и существенным различием масштаба тока и напряжения в пропускном и запирающем направлениях. Для наблюдения характеристики в координатных осях можно воспользоваться двухлучевым осциллографом либо оборудовать схему электронным переключателем.

Наиболее употребительна классификационная характеристика. Ее так же, как и статическую характеристику, снимают раздельно в пропускном и в запирающем направлениях, но через вентиль пропускают не постоянный ток, а пульсирующий, однополупериодный. В пропускном направлении ток должен иметь синусоидальную форму, а в запирающем направлении к вентилю прикладывается однополупериодное синусоидальное напряжение. Измерения тока и напряжения производят приборами магнитоэлектрической системы, т. е. определяют средние значения за период. Классификационные характеристики приближают условия измерения параметров к реальным условиям работы выпрямителей, но полностью им не отвечают из-за раздельного снятия характеристик в пропускном и в запирающем направлениях.

При снятии вольт-амперной характеристики в пропускном направлении надо следить за тем, чтобы температура вентилей существенно не повышалась в процессе измерения из-за нагрева током. Иногда вентили укрепляют на радиаторах, рассеивающих тепло. Следует учитывать также формовку вентилей под влиянием приложенного обратного напряжения. Формовка может протекать довольно быстро, и вид обратной вольт-амперной характеристики становится неопределенным, так как обратный ток непрерывно изменяется. В таких случаях иногда предварительно подформовывают вентили до установившегося значения обратного тока, а затем снимают характеристику по точкам.

Вольт-амперные характеристики дают возможность сравнивать вентили по их способности к перегрузке по току. Во многих случаях выпрямители работают в форсированном режиме при значении выпрямленного тока, в несколько раз превышающем номинальные значения. Это возможно при искусственном отводе тепла, например при обдувке воздухом или работе выпрямителей в масляной среде.

При увеличении прямого тока падение напряжения в выпрямителе возрастает соответственно с крутизной вольт-амперной характеристики составляющих его вентилей. Из представленных на рис. 6 двух характеристик одна обладает большей крутизной, чем вторая. Естественно, что вентиль с большей крутизной характеристики более подходит для работы в условиях перегрузки, чем вентиль, у которого характеристика идет более полого и падение напряжения в пропускном направлении сильно возрастает.

Для определения перегрузочной способности вентилей вольт-амперные характеристики надо снимать до значений прямого тока, в несколько раз превышающих номинальное. В рассматриваемом случае, когда речь идет о больших плотностях тока, удобно представлять вольт-амперную характеристику в виде ломаной линии (рис. 7) и характеризовать ее двумя параметрами: пороговым на-

пряжением E_0 и сопротивлением вентиля в пропускном направлении ρ.

Пороговое напряжение E_0 представляет собой как бы фиктивную э. д. с., включенную навстречу вентилю. До превышения напряжения E_0 прямой ток через вентиль равен нулю, а затем он изменяется по линейному закону, и сопротивление вентиля равно $\operatorname{tg}\alpha$. Очевидно, что чем меньше E_0 и ρ, тем лучше качество вентиля. Для идеального вентиля E_0 и ρ равны нулю, т. е. вольт-амперная характеристика сливается с осью ординат.

Электрические характеристики селеновых вентилей зависят от температуры. В прямом направлении падение напряжения при повышении температуры уменьшается, а при понижении температуры возрастает.

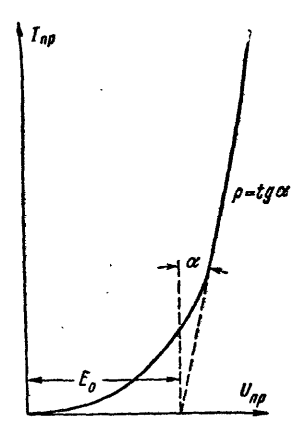


Рис. 7. Представление вольт-амперной характеристики в виде ломаной линии.

Что касается обратного тока, то изменение его с температурой зависит от приложенного напряжения. При малых значениях напряжения обратный ток изменяется с температурой незначительно. Чем выше приложенное напряжение, тем сильнее изменение тока, причем оно происходит по кривой с минимумом, т. е. ток возрастает как с увеличением температуры, так и с понижением ее (рис. 8). Положение точки минимума находится в области положительных температур, в районе 20—30° С, и перемещается с изменением температуры.

Необходимо подчеркнуть, что увеличение обратного тока при понижении температуры до нижнего рабочего предела селеновых вентилей, т. е. до —60° С, может быть очень большим и зависит от типа вентилей (рис. 9). Особенно чувствительны к охлаждению вентили серии Г. При температуре —60° С падение напряжения у них может возрасти в 2 раза, а обратный ток может увеличиться в десятки раз.

При массовом изготовлении селеновых вентилей невозможно для каждого из них снимать полную вольт-амперную характеристику. Поэтому электрические свойства вентилей характеризуются двумя точками на классификационной вольт-амперной характеристике. Одна точка — среднее значение падения напряжения на вентиле при протекании через него однофазного однополупериодного выпрямленного тока номинального значения. Этот параметр характеризует группу вентиля. Вторая точка — среднее значение обратного тока при приложении к вентилю в запирающем направлении однополупериодного синусоидального напряжения. Величина напряжения определяется по классификационным таблицам. Чем больше обратный ток, тем хуже вентиль и тем меньше допускаемое для него рабочее напряжение.

Величина рабочего обратного напряжения определяет класс вентиля. Всего имеется 3 группы и 6 классов вентилей. Лучшая четвертая группа присваивается вентилям, у которых падение напряжения

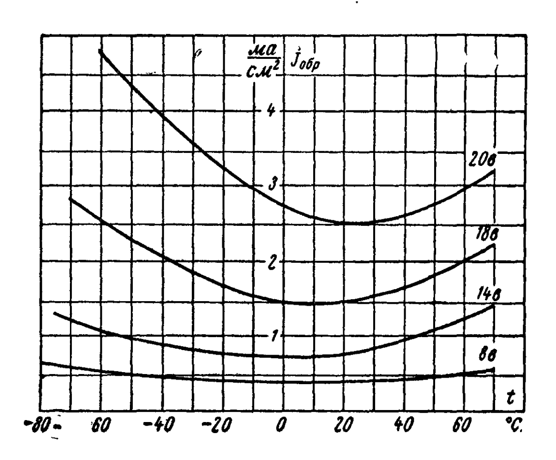


Рис. 8. Изменение обратного тока селенового вентиля с температурой при разных приложенных напряжениях.

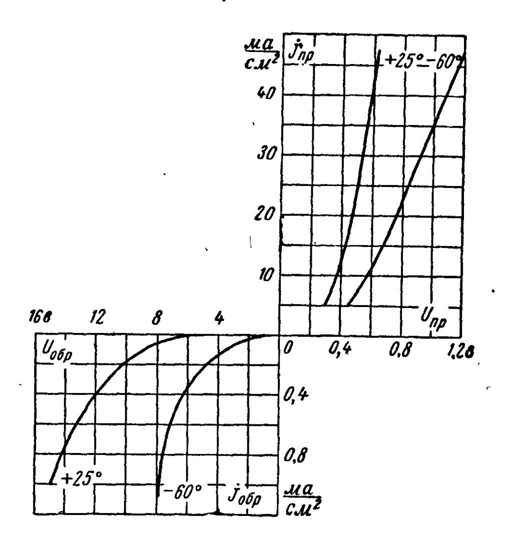


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика вентиля серии А при температуре +25° и —60° С.

в пропускном направлении не превышает 0,45 *в*; затем идет третья группа вентилей с падением напряжения в пределах 0,45—0,55 *в* и, наконец, вторая группа с падением напряжения 0,55—0,65 *в*.

Разделение на классы производится через 5 *в*.

Класс вентиля	В	Г	Д	Е	И	К
Действующее значение рабочего напряжения, *в*	20	25	30	35	40	45

Классы Е, И и К присваиваются только вентилям серии Г.

Для определения падения напряжения в пропускном направлении и для измерения обратного тока пользуются определенными схемами. Основным элементом схем является источник однофазного однополупериодного напряжения. На рис. 10 дана принципиальная схема такого источника.

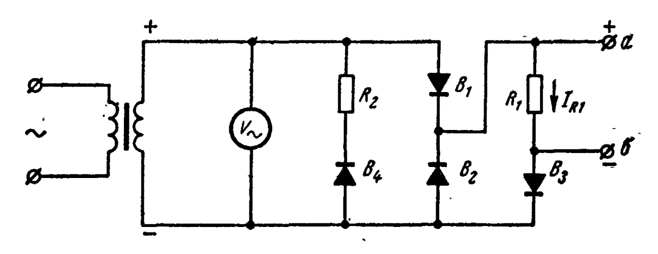


Рис. 10. Принципиальная схема источника однофазного однополупериодного напряжения.

Как видно из рисунка, вентили B_1 и B_2 включены навстречу друг другу. Напряжение снимается с вентиля B_2. При полярности напряжения на трансформаторе, указанной на рисунке, вентиль B_1 оказывается включенным в прямом направлении, а вентиль B_2 — в запирающем. Поэтому вентиль B_2 принимает на себя полное напряжение трансформатора, и оно передается на точки *а* и *б* схемы через резистор R_1. При перемене полярности напряжения на трансформаторе напряжение принимает на себя вентиль B_1, а на вентиле B_2 падает малое напряжение. Оно делится между вентилем B_3 и резистором R_1, поскольку цепочка вентиль $B_3 — R_1$ включена параллельно вентилю B_2. Так как вентиль B_3 оказывается включенным в запирающем направлении, то на него приходится все напряжение вентиля B_2, а на резисторе R_1 оно практически отсутствует. Таким образом, отсекается обратная полуволна и на клеммах *а* и *б* получается однополупериодное синусоидальное напряжение. Для того чтобы трансформатор был равномерно загружен в течение обоих полупериодов, включается цепочка вентиль $B_4 — R_2$.

При измерении обратного тока в плечах схемы вместо одного вентиля надо соединять несколько вентилей последовательно.

Селеновый вентиль — нелинейный элемент, поэтому для соблюдения синусоидальности формы тока, протекающего через него при измерении прямого падения напряжения, последовательно с вентилем включают балластный резистор R с большим сопротивлением.

Падение напряжения на балластном резисторе должно быть около 4—5 *в*. Схема измерения приведена на рис. 11.

При измерении обратного тока может искажаться форма напряжения, подаваемого на измеряемый вентиль. Поэтому сопротивление резистора R_1 в схеме рис. 10 должно быть выбрано небольшим. Потребляемый резистором ток I_{R_1} должен примерно в 10 раз превышать обратный ток испытуемого вентиля. Схема измерения обратного тока приведена на рис. 12.

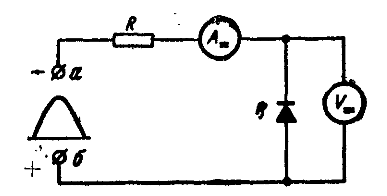


Рис. 11. Схема измерения падения напряжения на вентиле в пропускном направлении.

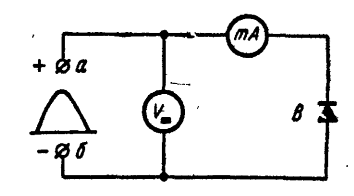


Рис. 12. Измерение обратного тока вентиля.

Необходимо соблюдать синусоидальность формы тока при измерении прямого падения напряжения и синусоидальность формы напряжения при измерении обратного тока В случае нарушения этих условий результаты измерений будут неправильными, так как среднее значение тока и напряжения зависит от их формы.

Приведенные схемы измерения прямого падения напряжения и обратного тока могут быть использованы для снятия классификационных вольт-амперных характеристик.

Электрические параметры селеновых выпрямителей

К основным электрическим параметрам селеновых выпрямителей относятся: выпрямленное напряжение, выпрямленный ток и величина подводимого переменного напряжения. Эти параметры зависят как от схемы выпрямления, так и от количества и характеристик вентилей, из которых собраны выпрямители.

Основные схемы соединения вентилей в выпрямителях приведены в табл. 1. Нетрудно видеть, что из выпрямительных столбиков вида Е можно собрать любую из выпрямительных схем табл. 1. Из двухплечего выпрямителя (вид Д) может быть собран однофазный или трехфазный мост. Он может быть также использован как единичный вентиль. В этом случае вывод ~ остается холостым.

Такие комбинированные соединения применяют потому, что количество вентилей в одном выпрямительном столбике ограничено. Для вентилей размером до 40×40 *мм* включительно это количество равно 32, а для вентилей больших размеров — 28. Предположим, что по условиям работы требуется трехфазный выпрямитель с выпрямленным напряжением 260 *в* при токе нагрузке 3,6 *а*. Такого выпрямителя в нормали нет. Имеется трехфазный выпрямитель с выпрямленным напряжением 130 *в* при подводимом переменном напряже-

Таблица 1

Вид выпрямителя	Электрическая схема соединения элементов	Буквенное обозначение выпрямителя
Единичный вентиль		Е
Двухплечий выпрямитель	~ – +	Д
Со средней точкой	+ ~ ~	С
Мост однофазный	~ + ~ –	М
Трехфазный мост	~ ~ ~ – +	Т

нии 120 *в*. Этот выпрямитель собран из 24 вентилей, по четыре вентиля в плече. Но мы можем получить требуемую трехфазную мостовую схему, если соединим между собой три двухплечих выпрямителя из 16 вентилей размером 75×75 *мм*. Такие выпрямительные столбики в нормали имеются. В этом случае в каждом плече трехфазной мостовой схемы окажется по восемь вентилей вместо четырех и величина выпрямленного напряжения окажется равной 260 *в* при подводимом переменном напряжении 240 *в*.

Для сокращенной характеристики выпрямителей применяются цифры и буквы, образующие маркировку выпрямителя. Например, обозначение 40ГМ24А расшифровывается следующим образом. Циф-

ра 40 обозначает квадратный вентиль со стороной 40 *мм*; буква Г относится к классу вентилей, из которых собран выпрямитель, в данном случае это вентили на 25 *в*; М обозначает однофазный мост; цифра 24 обозначает общее количество вентилей в четырех плечах моста (6 вентилей в каждом плече); буква А определяет технологическое и конструктивное исполнение вентилей; в данном случае это вентили серии А с «открытым» запирающим слоем. Величина допустимого тока нагрузки не входит в обозначение выпрямителя, поскольку она косвенно определяется размерами вентиля. В табл. 2 приведены номинальные значения выпрямленного тока.

Таблица 2

Размеры вентиля, *мм*	⌀18 или 15×15	⌀25 или 22×22	30×30	40×40	60×60	75×75	100×100
Номинальное значение выпрямленного тока, *а*	0,04	0,075	0,15	0,3	0,6	1,2	2,0

В приведенной таблице токи нагрузки даны для выпрямителей вида Е. Для других схем включения ток нагрузки легко вычисляется по известным соотношениям: для однофазного моста он удваивается, для схемы трехфазного моста берется утроенное значение против указанного в табл. 2.

По маркировке выпрямителя можно с достаточной точностью определить его параметры. Сделаем это для уже рассмотренного нами выпрямителя 40ГМ24А. По табл. 2 для вентилей размером 40×40 *мм* номинальное значение тока равно 0,3 *а*. Наш выпрямитель собран по схеме однофазного моста, следовательно, он рассчитан на выпрямленный ток 0,6 *а*. В каждом плече моста 6 вентилей класса Г. Подводимое к мосту действующее значение переменного напряжения может быть равно 25×6=150 *в*.

Величина выпрямленного напряжения для случая однофазного моста равна:

$$U_d = 0,9U_{\sim} - 4\Delta Un,$$

где U_d — величина выпрямленного напряжения;

$U_{\sim}$ — значение подводимого переменного напряжения;

ΔU — падение напряжения на одном вентиле;

n — количество вентилей в плече моста.

Примем ΔU=0,6 *в*. Тогда U_d =150·9—4·0,6·6=120,6 *в*.

При использовании селеновых выпрямителей в различных схемах выпрямления надо учитывать некоторые их особенности. В частности, для правильного расчета необходимого количества вентилей надо уметь определять величину обратного напряжения на плечо выпрямителя.

В табл. 3 представлены основные схемы выпрямления, даны соотношения между переменным и выпрямленным напряжением, а также приведены расчетные значения амплитуды обратного напряжения на плечо выпрямителя. Для простоты каждое плечо выпрями-

Таблица 3

Схема выпрямителя	Форма выпрямленного напряжения	Соотношение между выпрямленным и переменным напряжением	Амплитуда обратного напряжения на вентиле
Однополупериодная		$U_d = 0{,}45U_{\sim}$	$1{,}41U_{\sim} = 3{,}14U_d$
Однополупериодная с конденсатором		При холостом ходе $U_d = 1{,}41U_{\sim}$	При холостом ходе $2{,}82U_{\sim}$

Продолжение табл. 3

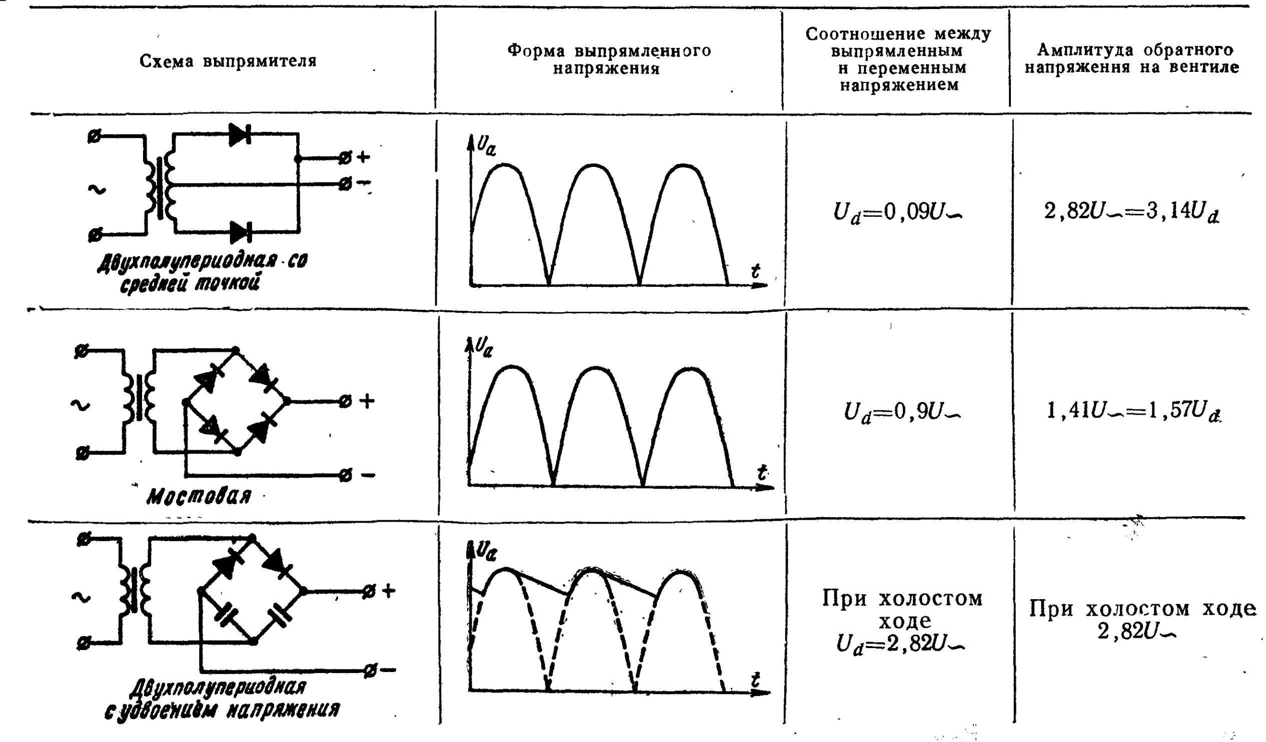


Схема выпрямителя	Форма выпрямленного напряжения	Соотношение между выпрямленным и переменным напряжением	Амплитуда обратного напряжения на вентиле
Двухполупериодная со средней точкой	U_a, t	$U_d=0{,}09U_{\sim}$	$2{,}82U_{\sim}=3{,}14U_d$
Мостовая	U_a, t	$U_d=0{,}9U_{\sim}$	$1{,}41U_{\sim}=1{,}57U_d$
Двухполупериодная с удвоением напряжения	U_a, t	При холостом ходе $U_d=2{,}82U_{\sim}$	При холостом ходе $2{,}82U_{\sim}$

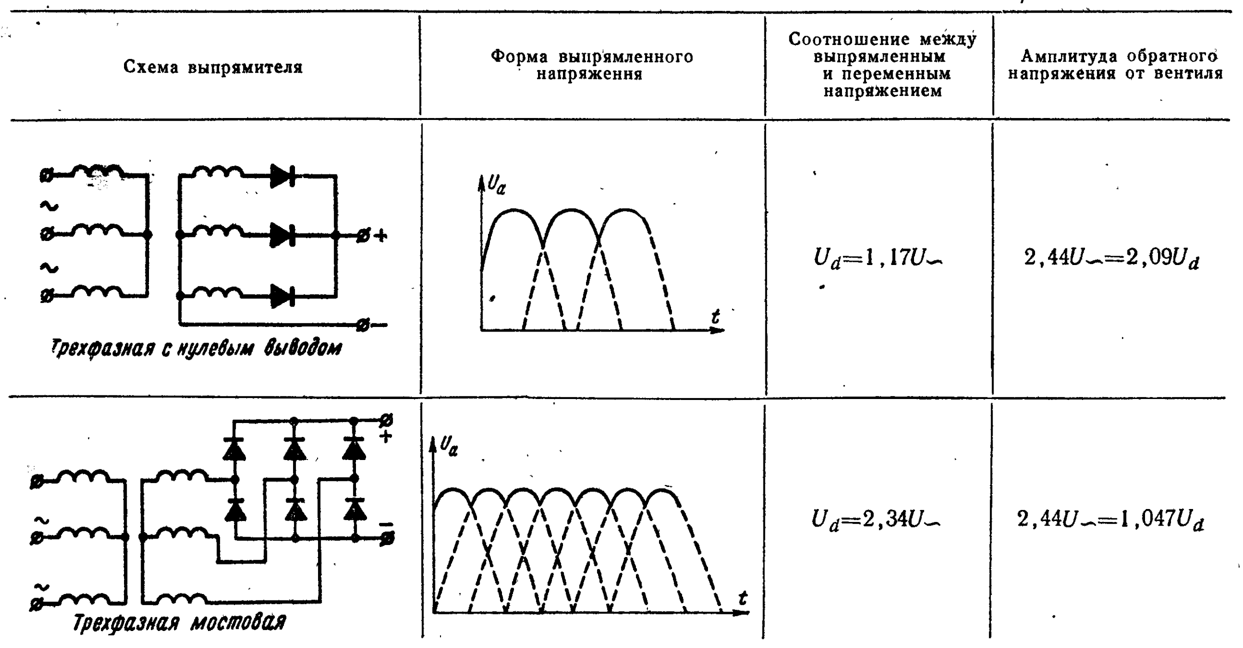


Схема выпрямителя	Форма выпрямленного напряжения	Соотношение между выпрямленным и переменным напряжением	Амплитуда обратного напряжения от вентиля
Трехфазная с нулевым выводом		$U_d = 1{,}17 U_{\sim}$	$2{,}44 U_{\sim} = 2{,}09 U_d$
Трехфазная мостовая		$U_d = 2{,}34 U_{\sim}$	$2{,}44 U_{\sim} = 1{,}047 U_d$

Примечания: 1. U_a — мгновенное значение выпрямленного напряжения.
2. $U_{\sim}$ — действующее значение переменного напряжения.
3. U_d — среднее значение выпрямленного напряжения.

теля представлено в виде одного вентиля. Все соотношения даны для идеализированного выпрямителя, не имеющего потерь в вентилях.

Рассмотрим некоторые особенности схем выпрямления. В однофазной однополупериодной схеме с емкостным фильтром амплитуда обратного напряжения в 2 раза больше, чем в схеме без конденсатора, так как во время обратной полуволны к вентилю приложено суммарное напряжение трансформатора и конденсатора. Таким образом, при одном и том же напряжении вторичной обмотки трансформатора количество последовательно соединенных вентилей в выпрямителе должно быть в 2 раза больше, чем в схеме без фильтра.

В однофазной двухполупериодной схеме со средней точкой количество плеч равно двум вместо четырех в мостовой схеме. Однако выигрыша в количестве вентилей не получается, так как амплитуда обратного напряжения на плечо в схеме со средней точкой равна 2,82 $U_{\sim}$, а в мостовой схеме 1,41 $U_{\sim}$. Количество вентилей в плече схемы со средней точкой должно быть в 2 раза больше, чем в мостовой схеме.

Часто применяется схема удвоения напряжения. Она целесообразна при высоком выпрямленном напряжении и малом токе. Поскольку схема обладает круто падающей характеристикой, желательно, чтобы нагрузка мало изменялась.

При необходимости получить выпрямленное напряжение с малой пульсацией пользуются трехфазными мостовыми схемами. Коэффициент пульсации для трехфазного моста равен 0,057, а для однофазной мостовой схемы 0,663.

В реальных выпрямителях надо учитывать падение напряжения в вентилях и вычитать его при расчете выпрямленного напряжения. Это легко сделать, умножив среднее значение падения напряжения на вентиле на количество вентилей в выпрямителе. Ориентировочно можно принять падение напряжения на вентиле 0,5—0,6 *в*.

Потери в выпрямителе зависят главным образом от тока нагрузки. Они определяют перегрев выпрямителя относительно температуры окружающей среды и коэффициент полезного действия. Перегрев выпрямителей от обратного тока составляет 5—9° С, а в целом при номинальной нагрузке перегрев выпрямительных столбиков не превышает 30° С.

Коэффициент полезного действия селеновых выпрямителей достигает максимального значения в районе 100% нагрузки. В пределах от 70 до 120% нагрузки он мало изменяется, а при уменьшении нагрузки выпрямителя до 40% и ниже — резко уменьшается.

Некоторые свойства и особенности эксплуатации селеновых выпрямителей

Селеновые выпрямители обладают специфическими свойствами, знание которых полезно для их правильной эксплуатации. Остановимся на некоторых из них.

Характерным свойством селеновых выпрямителей является изменение величины падения напряжения в пропускном направлении и обратного тока в процессе эксплуатации и хранения.

Падение напряжения в пропускном направлении при длительной

эксплуатации выпрямителей необратимо возрастает. Это явление называется старением выпрямителей.

Увеличение обратного тока при длительном хранении выпрямителей в обесточенном состоянии называется расформовкой. В отличие от старения расформовка — обратимый процесс, и величина обратного тока может быть восстановлена до первоначального значения.

Рассмотрим процессы старения и расформовки выпрямителей более подробно. Для этого надо проанализировать физические явления, которые могут протекать в селеновых вентилях.

Увеличение падения напряжения в селеновых вентилях может произойти по нескольким причинам. Одной из причин может быть возрастание сопротивления слоя электронного полупроводника (сульфида или селенида кадмия) вследствие его утолщения. Во-вторых, может увеличиться сопротивление слоя селена, расположенного между обоими электродами вентиля. И третьей причиной может быть ухудшение контакта на границе селена с висмутированным алюминием.

Мы уже выяснили, что слои электронного полупроводника в селеновых вентилях образуются при электрической формовке, во время которой к вентилям приложено значительное обратное напряжение. При этом вентили нагреваются до температуры 80—90° С. Во время эксплуатации выпрямителей вентили находятся в более легком режиме, чем при электрической формовке. Они работают под меньшим обратным напряжением и при более низкой температуре. Кроме того, уже образованные слои сульфида или селенида кадмия (CdS и $CdSe$) препятствуют движению атомов кадмия к слою селена. Однако надо учитывать фактор времени.

Формовка как специальная технологическая операция длится несколько часов, а время работы выпрямителей исчисляется тысячами часов. Поэтому может происходить медленное, постепенное нарастание слоев электронного полупроводника, приводящее к увеличению сопротивления вентиля, т. е. к его старению. Этот механизм старения является главным.

Старение в значительной степени зависит от температуры, при которой работают выпрямители. Чем она выше, тем быстрее идет этот процесс. Действительно, с ростом температуры ускоряются процессы диффузии и скорость образования новых соединений CdS и $CdSe$. Должно ускоряться также образование селенидов у омического контакта с селеном, что при неблагоприятных условиях может быть одним из элементов старения.

От температуры зависит также улетучивание галоидов из толщи селена, что ухудшает его электропроводность. Наличие галоидов в селене является обязательным условием для длительной работы вентилей без существенного старения. Специально поставленные эксперименты показали, что вентили, изготовленные из селена, в который не вводились галоиды, не могут длительно работать. Они очень быстро стареют. Дело в том, что галоиды являются примесью, которая компенсирует вредное действие в селене многих веществ и, в частности, металлов. Галоиды при достаточном содержании их в селене в состоянии компенсировать даже действие таллия. При отсутствии галоидов диффузия атомов металлов из электродов вентиля в глубь селена может привести к быстрому увеличению его сопротивления и, следовательно, к ускоренному старению вентиля.

Особенно это опасно при наличии в катодном сплаве присадки таллия. Экспериментальные таллиевые вентили, изготовленные с безгалоидным селеном, состариваются при высокой температуре за несколько часов.

Естественно, что старение селеновых выпрямителей зависит от времени эксплуатации. Заводы-изготовители гарантируют срок службы селеновых выпрямителей в течение нескольких десятков тысяч часов, т. е. практически неограниченное время, но при этом оговаривается предельная рабочая температура нагрева вентелей: 75° С для выпрямителей серии А и 80° С для выпрямителей серии Г.

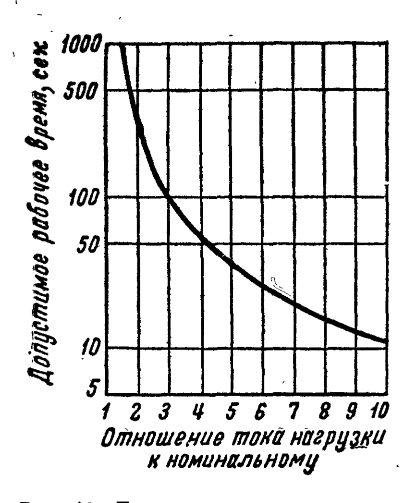


Рис. 13. Допустимая длительность кратковременных перегрузок выпрямителей в зависимости от кратности тока нагрузки.

При температуре окружающей среды не выше +35° С выпрямители могут работать при номинальных значениях тока и напряжения, а при повышении температуры значения выпрямленного тока и подводимого переменного напряжения снижаются. Так, при температуре окружающей среды в пределах 35—50° С выпрямленный ток снижается на 20%, а при температуре выше 50° С — на 40%.

При искусственном воздушном или масляном охлаждении нормы нагрузок изменяются, но остается в силе требование к предельной температуре нагрева выпрямителей. То же относится к режиму повторно-кратковременной нагрузки.

Допускается кратковременная значительная перегрузка селеновых выпрямителей по току. На рис. 13 представлена зависимость длительности кратковременных перегрузок от кратности тока нагрузки. Эта кривая дает лишь примерное представление о величине и длительности безопасной перегрузки, не влияющей на гарантированный срок службы вентиля.

Перейдем к явлению расформовки. Если включить выпрямители в схему для измерения обратного тока, например, тока холостого хода однофазного моста, то можно видеть, что в первый момент обратный ток больше номинального, а затем постепенно уменьшается. Мы наблюдаем, таким образом, восстановление величины обратного тока у расформовавшегося выпрямителя до ее номинального значения.

Для того чтобы понять, с какими процессами связана расформовка, рассмотрим относящиеся к ней характерные явления. Расформовка наблюдается только у вентилей, длительное время находившихся в обесточенном состоянии. В том случае, когда выпрямители хранятся в нормальных условиях, хорошо защищены от

действия влаги лакокрасочными покрытиями или герметизированы, обратный ток при включении быстро уменьшается до установившегося значения, равного номинальному. Спад величины обратного тока может быть значительно ускорен, если подводимое к выпрямителю переменное напряжение увеличить на некоторое время на 30—40% против номинального значения.

Расформовка характерна для выпрямителей серии А. У выпрямителей серии Г процесс расформовки, как правило, отсутствует.

Расформовка значительно усиливается при хранении выпрямителей в условиях повышенной влажности. В этом случае часто бывает недостаточным включение выпрямителей под напряжение. Выпрямители надо подсушивать и формовать специальным образом, медленно повышая напряжение.

Механизмов расформовки может быть несколько. Один из них — диффузия галоидов из толщи селена в область запирающего слоя. Этот процесс является обратным по отношению к обеднению примесными центрами пограничного слоя селена в процессе электрической формовки.

При подаче на расформовавшийся вентиль напряжения ионы галоидов выходят из области *p-n* перехода, тем самым увеличивая его сопротивление. Очевидно, что чем меньше концентрация галоидов в селене, тем меньше должен проявляться эффект расформовки, связанный с диффузией галоидов.

В вентилях серии Г концентрация галоидов меньше, чем в вентилях серии А, и поэтому процесс расформовки у них при нормальном хранении почти не наблюдается. Может даже наблюдаться обратный процесс, когда при хранении обратный ток у вентилей этой серии уменьшается. Это связано с продолжающимся ростом слоя электронного полупроводника. В этом случае говорят, что старение является продолжением формовки.

Расформовка селеновых вентилей, длительно находившихся в условиях повышенной влажности, связана с химическими и электрохимическими процессами, возникающими вследствие проникновения влаги внутрь вентиля. В частности, процесс расформовки связан с изменением химического состава электронного полупроводника.

У вентилей серии Г электронно-дырочный переход надежно защищен от проникновения влаги самой структурой вентиля и химического изменения электронного полупроводника не происходит.

Следует избегать длительного включения выпрямителей в цепи, где ток проходит только в прямом направлении, потому что при этом вентили сильно расформовываются.

При включении выпрямителей, длительно находившихся в нерабочем состоянии, иногда наблюдается пробой вентилей в одной или даже в нескольких точках. В месте пробоя проскакивает искра. Это явление не представляет для выпрямителя опасности, так как пробой вентилей не приводит к закорачиванию. Пробивается наиболее слабое место в запирающем слое.

Вследствие сильного разогрева вентиля в месте пробоя селен расплавляется, а затем при затвердевании остается аморфным, непроводящим и изолирует пробитое место. Вокруг точки пробоя виден характерный кратер.

Пробой вентилей может наблюдаться и у работающего выпрямителя, когда не имеет места расформовка. Причиной пробоя в этом

случае может быть неравномерное распределение напряжения между последовательно включенным вентилями, в особенности если выпрямитель включен в электросеть со значительным колебанием напряжения. Поскольку пробой происходит мгновенно, он практически не нарушает работу выпрямительного устройства.

В технологии изготовления вентилей предусмотрена специальная операция выжигания «слабых» участков и короткозамкнутых мостиков в *p-n* переходе. С этой целью на вентиль в запирающем направлении многократно разряжают конденсатор. Некоторые вентили прожигаются в нескольких местах. В технических условиях оговаривается количество прожогов на вентилях разных размеров. Если на вентиле наблюдается не прекращающееся искрение, то это означает весьма сильное повреждение запирающего слоя. Такой вентиль должен быть заменен.

Некоторые радиолюбители сами разбирают выпрямительные столбики, заменяют вентили или изменяют количество вентилей в плечах выпрямителя. В этих случаях заводы-изготовители не гарантируют исправной работы выпрямителя.

Если все же радиолюбитель производит разборку выпрямителя, то он должен тщательно следить за тем, чтобы при сборке не нарушался контакт между вентилями. Такая опасность всегда имеется, так как выпрямительные столбики окрашивают методом окунания и краска вплотную подходит к месту контакта, заполняя поры и щели. При трогании вентиля с места может образоваться изолирующий участок в контактном узле. Ни в коем случае нельзя сокращать расстояние между вентилями, так как это может резко нарушить тепловой баланс выпрямителя.

Селеновые вентили обладают значительной емкостью, так как они имеют большую площадь *p-n* перехода. В среднем вентили обладают емкостью 0,02 *мкф/см*². Согласно техническим условиям паспортные данные селеновых выпрямителей действительны для частот до 1 000 *гц*.

Характеризуя свойства селеновых выпрямителей, следует также остановиться на особенности их работы в условиях низкой температуры. Мы уже отмечали, что при понижении температуры характеристики вентилей ухудшаются как в пропускном, так и в запирающем направлениях. Это отражается на параметрах выпрямителей, в особенности если они включены по однополупериодной схеме. Резко снижается величина выпрямленного напряжения, особенно в начальный период, когда выпрямитель еще не нагрелся.

Через некоторое время после включения вследствие выделяющейся в выпрямителе большой мощности температура его повышается относительно окружающей среды и ухудшение параметров становится не столь значительным. Тем не менее для выпрямителей серии Г оговаривается снижение выпрямленного напряжения при температуре —60° С до 12—15% в зависимости от схемы включения.

Номенклатура выпрямителей

При выборе для конкретной цели выпрямительного столбика можно руководствоваться частными техническими условиями, в которых приведены наименования и номинальные электрические параметры типовых выпрямителей открытой конструкции.

В частных технических условиях приведены данные по выпрямителям всех классов: В, Г, Д, Е, И и К. Так как выпрямители классов И и К собраны из вентилей с повышенным обратным напряжением, то их размеры и вес меньше, чем у выпрямителей других классов.

Для примера сравним два выпрямительных столбика, собранных по мостовой схеме, на одинаковое подводимое переменное напряжение 200 *в* и ток нагрузки 0,6 *а*. Выпрямитель из вентилей класса Г с обратным напряжением 25 *в* содержит в каждом плече моста по 8 вентилей при общем количестве 32. Шифр выпрямителя 40ГМ32А. Размер столбика 220 *мм*, вес 0,35 *кг*.

Выпрямитель из вентилей класса И имеет шифр 40ИМ20Г. Число вентилей в каждом плече моста равно 5, а общее число вентилей 20. Размер столбика 155 *мм*, вес 0,235 *кг*.

Таким образом, выпрямитель из 40-вольтовых вентилей на 65 *мм* короче и на 115 *г* легче, чем выпрямитель из вентилей серии Г с обратным напряжением 25 *в*.

В технических условиях представлены выпрямители, собранные по схемам двухплечего выпрямителя, выпрямителя со средней точкой, однофазного и трехфазного моста. Выпрямители, собранные по схеме вентиль, как специальный тип отсутствуют, так как они полностью заменяются выпрямителями со средним выводом. Номенклатура двухплечих выпрямителей рассчитана на подводимое переменное напряжение от 40 до 640 *в* для вентилей класса В и от 90 до 1 440 *в* для вентилей класса К. Величина выпрямленного напряжения, определенная в однофазной однополупериодной схеме, соответственно изменяется от 14 до 230 *в* и от 36 до 575 *в*.

Выпрямители со средней точкой представлены только одним типом — двумя вентилями, включенными навстречу друг другу, поскольку такой выпрямитель не может быть собран из двухплечих столбиков. Эти выпрямители имеют шифр с окончанием С2А или С2Г (например, 15ВС2А или 75ИС2Г), где С обозначает вид принципиальной схемы, 2 обозначает количество вентилей, а буквы А и Г — конструкцию вентилей.

Мостовые схемы представлены выпрямителями с величиной подводимого переменного напряжения от 20 до 160 *в* для вентилей класса В и от 45 до 360 *в* для вентилей класса К. Соответственно величина выходного напряжения равна 14—115 и 35—285 *в*.

Начиная с вентилей размерами 75×75 *мм*, комплектуются выпрямители, собранные по схеме трехфазного моста. В соответствии с особыми условиями работы вентилей в трехфазной схеме (более длительное время прохождения обратного тока) величина подводимого переменного напряжения снижается на 12—15% по сравнению с другими схемами выпрямления. Так, для вентилей класса Г она равна 22 *в* вместо 25 *в*, а для вентилей класса Е — 30 *в* вместо 35 *в*. Для выпрямителей, собранных по схеме трехфазного моста, выпрямленное напряжение в среднем на 15% больше подводимого переменного напряжения.

Некоторые типы выпрямителей, начиная с размеров 100×100 *мм* и выше, выпускаются с параллельным соединением вентилей. Например, выпрямитель 100ЕМ24Г6, собранный по мостовой схеме, имеет 6 параллельных вентилей (цифра 6 в маркировке выпрямителя) в каждом плече моста, а всего 24 вентиля. Выпрямленный ток равен 21,5 *а*. Он несколько меньше шестикратного тока по отношению

к обычной схеме без параллельного включения, так как учитывается вероятность неравномерного распределения тока между вентилями, что может повлечь за собой перегрев выпрямителя.

Кроме выпрямителей серий А и Г, выпускаются выпрямители серии Я, способные работать при удвоенной плотности тока. Так, если для однофазного моста из обычных вентилей размером 40×40 *мм* ток нагрузки равен 0,6 *а*, то для выпрямительного столбика серии Я он равен 1,2 *а*.

Соответственно для выпрямителей этой серии уменьшаются размеры и вес на единицу выпрямленной мощности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Геллер Исаак Хаимович

Селеновые выпрямители. М.—Л., изд-во «Энергия», 1966, 32 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 615).

Редактор *Ю. Л. Голубев*
Технический редактор *Н. В. Сергеев*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 30/III-66 г. Подписано в печать 15/VIII-66 г. Бумага типографская № 2 $84 \times 108^{1}/_{32}$
Физ. печ. л. 1,0 Усл. печ. л 1,68 Уч-изд. л. 1,92
Т-11077 Тираж 80 000 экз Цеиа 08 коп. Зак. 628
Издательство «Энергия» Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Владимирская типография Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.